

## Red de sensores de fibra óptica con amplificación Raman distribuida y multiplexación en longitud de onda

### Application of distributed fiber Raman amplification to a wavelength-division-multiplexed network for sensors

Silvia Díaz <sup>(1)</sup>, Gorka Lasheras <sup>(1)</sup>, Manuel López-Amo <sup>(1)</sup>, Paul Urquhart <sup>(1)</sup>, César Jáuregui <sup>(1)</sup>, José Miguel López-Higuera <sup>(2)</sup>

1. Departamento de IEE, Universidad Pública de Navarra, Campus de Arrosadia s/n, 31006 Pamplona.  
Email: [silvia.diaz@unavarra.es](mailto:silvia.diaz@unavarra.es)
2. Departamento TEISA, Universidad de Cantabria, Avda. los Castros s/n, 39005, Santander

#### RESUMEN:

En este trabajo se presenta la aplicación de la amplificación Raman a la multiplexación en longitud de onda de sensores de fibra óptica. Para ello se ha desarrollado experimentalmente una red en forma de bus utilizando fibra convencional monomodo en la que se direccionan los sensores utilizando multiplexación en longitud de onda. Cada sensor viene identificado únicamente por la reflexión desde una red de difracción Bragg (FBG) y la ganancia distribuida tiene por objeto aumentar el número de sensores sin utilizar costosos amplificadores discretos. Mostramos que esta topología permite ecualizar la potencia recibida de los sensores, utilizando sólo una longitud de onda de bombeo e investigamos la dependencia con la potencia de bombeo utilizada. El filtrado espectral de las FBGs, junto con la ganancia distribuida, permiten reducir el ruido. Mostramos las relaciones señal a ruido medidas.

**Palabras clave:** Multiplexación por división en longitud de onda (WDM), buses de datos, amplificación distribuida, amplificador Raman de fibra, sensores de fibra óptica.

#### ABSTRACT:

We experimentally demonstrate a novel application of distributed fiber Raman amplification to a bus network for the wavelength multiplexing of optical sensors. Each sensor is uniquely identified by reflection from a fiber Bragg grating (FBG) and the distributed gain allows the number of sensors to be increased without using costly lumped amplifiers. We show how the topology allows the received powers from the sensors to be equalized, even though only one Raman pump wavelength is used and we investigate how the performance depends on the launched pump power. The spectral filtering of the FBGs, combined with the distributed gain, jointly reduce the noise and we report measured signal to noise ratios.

---

#### REFERENCIAS Y ENLACES.

- [1] A. Dandridge, C. Kirkendell, *Passive Fiber Optic Sensor Networks, Ch. 21 of Handbook of Optical Fiber Sensing Technology*, J. M. López-Higuera, (Editor), John Wiley, 2002.
- [2] M. López-Amo, L. T. Blair and P. Urquhart, "Wavelength-Division-Multiplexed Distributed Optical Fiber Amplifier Bus Network for Data and Sensors", *Opt. Lett.* **18**, 1159-1161 (1993).

- [3] R. Hernández-Lorenzo, M. López-Amo and P. Urquhart, "Single and Double Distributed Optical Amplifier Fiber Bus Networks with Wavelength Division Multiplexing for Photonic Sensors", *J. Lightwave Technol.* **16**, 485-489 (1998).
- [4] J. H. Lee, Y. M. Chang, Y. G. Han et al., "Raman Amplifier-Based Long-Distance Remote, Strain and Temperature Sensing System Using an Erbium-Doped Fiber and a Fiber Bragg Grating", *Opt. Express* **12**, 3515-3520 (2004).
- [5] Y. Nakajima, Y. Sindo and T. Yoshikawa, "Novel concept as long-distance transmission FBG sensor system using distributed Raman amplifier", Proceedings of the 16<sup>th</sup> International conference on Optical Fiber Sensor Conference (OFS-16), 530-533 (2003).
- [6] E. Desurvire, *Erbium Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications, Ch. 2*, John Wiley, (1994).
- [7] J. Bromage, P. J. Winzer, R. J. Essiambre, *Multiple Path Interference and its Impact on System Design, Ch. 15 of Raman Amplifiers for Telecommunications 2*, M. N. Islam (Editor), Springer, (2004).
- [8] V. Montoya, M. López-Amo and S. Abad, "Improved double-fiber-bus with distributed optical amplification for wavelength-division multiplexing of photonic sensors", *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12**, 1270-1272 (2000).
- [9] I. Labiano, S. Abad and M. López-Amo, "Suppression of ASE effects in optically amplified sensor networks, Proceedings of the 16<sup>th</sup> International conference on Optical Fiber Sensor Conference (OFS-16), 364-367 (2003).

## 1.- Introducción

La multiplexación de sensores de fibra óptica tiene muy diversas aplicaciones, entre las que destaca la monitorización tanto de la información relativa a diversos parámetros ambientales, como temperatura, presión o tensión, como del funcionamiento de equipos remotos.

Los esquemas eficientes de multiplexación de sensores permiten que el cableado de fibra y los componentes en cabecera y fin de red se puedan compartir, y por tanto, reducir costes. Las arquitecturas en bus se han utilizado ampliamente, debido a su simplicidad de cableado [1]. Existen ejemplos previos de redes ópticas de sensores multiplexados en longitud de onda, configuradas como un bus lineal, que se han realizado para direccionar y por tanto, recuperar datos de sensores ópticos [2]. El bus de fibra consiste en una espina principal que conecta una serie de acopladores direccionales que terminan en elementos sensores, seguidos de redes de difracción Bragg (FBG). Los sensores proporcionan la modulación en amplitud, fase o polarización, mientras que las redes Bragg reflejan las señales incidentes dentro de una banda de longitudes de onda estrecha, con una longitud de onda central predeterminada. Así se identifican, por tanto, de manera única, los sensores al ser interrogados.

Sin embargo, a pesar de su atrayente simplicidad, las redes tipo bus de fibra óptica que no incluyen amplificación presentan la desventaja de que la potencia óptica en los sensores va disminuyendo a lo largo del bus y esto limita el

número de sensores que pueden ser interrogados dentro de relaciones señal a ruido (SNRs) aceptables. Los amplificadores ópticos (tales como amplificadores de fibra dopada con erbio, EDFAs) pueden situarse dentro del bus para evitar esta limitación, pero son dispositivos costosos que requieren fuentes de potencia eléctrica. Alternativamente, se puede fabricar todo el bus con fibra dopada con erbio con una baja densidad de dopado para proporcionar ganancia distribuida [3], [4]. Esta estrategia es correcta, pero requiere fibra especial (potencialmente más costosa).

En este trabajo, se demuestra el uso de la amplificación Raman en la rama principal de una red de fibra óptica en forma de bus para mantener las potencias recibidas de los sensores dentro de niveles aceptables. Como precedente inmediato, se debe resaltar que ya se ha aplicado amplificación Raman con dos longitudes de onda de bombeo, junto con un EDFA, en un sistema de sensado de larga distancia utilizando una red de difracción Bragg [4], [5].

En nuestro trabajo, que utiliza multiplexación en longitud de onda para la identificación de sensores dentro de la red, se demuestra el uso de la ganancia Raman como medio de amplificación y equalización de las potencias recibidas de un número independiente de sensores.

## 2.- Configuración de la red

La figura 1 representa la configuración experimental del bus con amplificación Raman. Se utilizó una red de 4 sensores, pero este número no

significa una limitación. Cada sensor incorpora una red de difracción Bragg FBG que identifica, por una longitud única a cada sensor dentro de la red. Las señales lanzadas inciden en todos los sensores, pero las redes Bragg aseguran que cada sensor devuelve sólo su señal característica hacia el punto de lanzamiento (cabecera de red) después de haber pasado a través del sensor una segunda vez. En nuestra demostración, se utilizaron sensores de intensidad por curvatura para evitar que las pérdidas de inserción de sensores más complejos pudieran enmascarar las medidas en potencia, y por tanto, asegurar una mayor generalidad de los resultados. Estos sensores son de fabricación propia y presentan un comportamiento estable. De esta forma, la red es válida para cualquier tipo de sensor de intensidad de tipo transmisivo o para sensores desarrollados sobre redes de difracción directamente. El bombeo Raman,

el láser de señal y el receptor se sitúan en un extremo del bus. Esta demostración se ha realizado en laboratorio, pero en operaciones de campo, esta estrategia evitaría los problemas logísticos consecuencia de proporcionar alimentación eléctrica para localizaciones remotas. El bombeo Raman se propaga co-direccionalmente al láser de señal, pero contra-direccionalmente a las señales de retorno de las redes Bragg. También se puede bombear desde el lado opuesto del bus (o incluso utilizar bombeo bi-direccional). Sin embargo, hay un principio general según el cual cuando se colocan varios amplificadores en cascada, se obtiene menor ruido si se sitúa el mejor amplificador al principio de la red [6], y éste es el caso en la configuración mostrada en la figura 1.

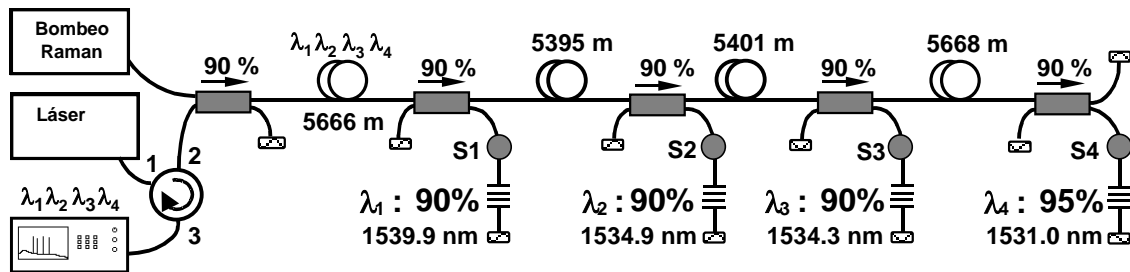


Fig. 1.- Red de multiplexación de sensores con amplificación Raman distribuida.

Se ha utilizado fibra monomodo estándar (norma ITU-G.652). Aunque tiene una baja eficiencia Raman (debido a su gran área efectiva), se utiliza ampliamente en las redes de telecomunicación, gracias a su bajo coste y por estar libre de impedimentos como la diafonía no lineal.

Los acopladores mostrados en la figura 1 son todos similares, con relaciones de acoplo 90:10 a las longitudes de onda de bombeo y de señal. Se utilizaron tramos de fibra de ~5 km entre los acopladores para emular una red de área metropolitana (ver figura 1 con los valores precisos). Sin embargo, no hay limitaciones estrictas en las longitudes. (En realidad, mayores vanos entre acopladores permitirían mejorar la eficiencia en el bombeo). Se utilizó gel adaptador de índices en todas las terminaciones del bus que quedan al aire para evitar reflexiones indeseadas. Esto es de particular importancia para minimizar interferencias [7]. La longitud de onda utilizada para el láser de bombeo es de 1445 nm y proporciona hasta 2W de potencia. Las señales que se emplean para los sensores se generan en un láser sintonizable (1460-1580 nm) que después de atravesar el circulator, tienen una potencia de -2.6 dBm y una anchura de línea espectral de 5 MHz. El láser de bombeo tiene polarización aleatoria, sin embargo, hay una

polarización elíptica residual procedente del láser de señal. Se estima que esto provoca errores máximos de  $\pm 0.5$  dB en los valores medidos de ganancia.

Las longitudes de onda de pico y reflectividades de las redes de difracción se muestran en la figura 1. Tienen una variación en longitud de onda con la temperatura de  $0.01$  °C/nm. Las longitudes de onda de las redes Bragg corresponden a cambios frecuenciales del bombeo que van desde 11.7 a 12.8 THz. Estos valores se seleccionaron para estar en la parte ascendente del perfil de ganancia Raman correspondientes a las longitudes de onda cortas (que es ~13.2 THz desde el bombeo en fibra monomodo estándar).

La curva de ganancia Raman es ascendente para las longitudes de onda seleccionadas. Esta propiedad se utilizó para obtener un grado de equalización de la potencia de las señales de retorno de los sensores. La estrategia fue colocar las redes de difracción Bragg correspondientes a altas ganancias Raman, más cercanas al bombeo, porque ahí es donde las señales experimentan las menores longitudes de interacción. Igualmente, las redes Bragg con longitudes de onda correspondientes a las ganancias Raman más bajas se colocaron más alejadas de la cabecera de red.

### 3.- Resultados

Inicialmente, se analiza la red sin bombeo (sin ganancia). En este caso, las pérdidas experimentadas por señales transmitidas desde un láser en cabecera de red y reflejadas en el detector son  $10\log_{10}[P_{\text{devuelta}}/P_{\text{lanzada}}]$ . Suponiendo que los acopladores se comportan de igual manera a cualquiera de las longitudes de onda utilizadas; y unas pérdidas en la fibra de 0.2 dB/km para todas las longitudes de onda de señal; las pérdidas en los sensores son las siguientes, en S1: 43.9, en S2: 47.7, en S3: 51.6 y en S4: 55.6 dB.

Estos valores vienen marcados por una componente de atenuación común de más 40 dB debido al doble recorrido a través de (a) acoplador de lanzamiento de señal y (b) acoplador de vuelta de cada sensor. La figura 2 representa las cuatro señales devueltas producidas mediante la sintonización del láser de señal consecutivamente a las longitudes de onda de cada red Bragg y puede verse que sus valores difieren, ya que las relaciones de acoplo de los acopladores no son exactamente 10 dB. El fondo de ruido viene dominado por las características del analizador de espectros óptico (HP70951B).

Para evaluar una red amplificadora, se define una potencia de transparencia de la rama principal o espina del bus. Éste es el valor de la potencia de bombeo Raman que es suficiente para compensar la atenuación de la señal debida a la fibra y a las pérdidas discretas experimentadas en los acopladores al atravesar la espina del bus. Sin embargo, esta potencia no incluye la compensación de las pérdidas de  $2 \times 10$  dB en el camino de ida y vuelta desde la rama principal del bus a los sensores, o las pérdidas del acoplador de lanzamiento de señal y el circulador. La figura 3 se ha obtenido utilizando el bombeo Raman. La potencia de bombeo seleccionada fue 500 mW, porque ésta es la potencia de transparencia en el bus para el camino de retorno desde S4. El resto de condiciones son las mismas que las de la figura 2.

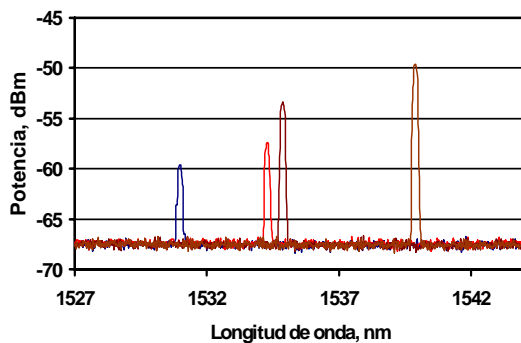


Fig. 2.- Potencia de salida obtenida sin aplicar bombeo.

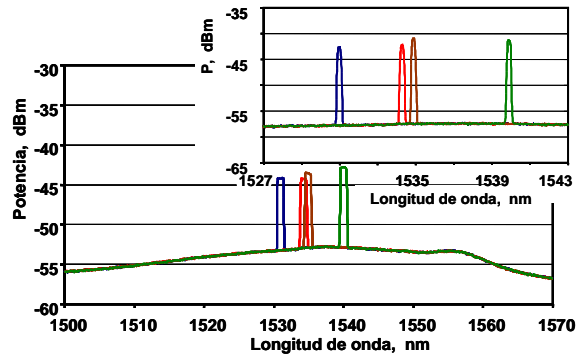


Fig. 3.- Señales de salida amplificadas obtenidas aplicando una potencia de bombeo de 500 mW. Las longitudes de onda son las mismas que las de la Fig. 2. En el recuadro se representan las señales ampliadas.

Se puede ver que las potencias de señal aumentan y se encuentran sobre un fondo de ruido ASS (Amplified Spontaneous Scattering). En la figura 4 se representan las curvas del ruido ASS.

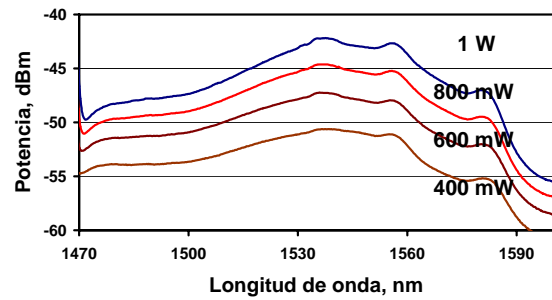


Fig. 4.- Potencia de ruido ASS obtenida aplicando potencias de bombeo de 400, 600, 800 y 1000 mW obtenidas para diferentes potencias de bombeo.

El ruido ASS fuera de banda es debido a la propagación contra-direccional con respecto al bombeo, ya que las redes Bragg actúan filtrando la componente co-direccional. Hay un grado de ecualización de las potencias recibidas de las cuatro redes Bragg. Esto es posible debido a la colocación de las redes de difracción en función de sus longitudes de onda, como se explicó en la sección 2. De esta forma, la ganancia Raman es mayor cuando la longitud de interacción entre el bombeo y la señal es más corta y viceversa, es menor cuando la longitud de interacción es más larga.

En la figura 5 se representa la correspondencia entre los perfiles de ganancia Raman y de ruido para un enlace de 20 km de fibra óptica y 400 mW de potencia de bombeo.

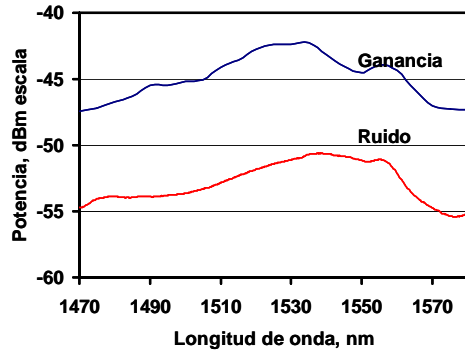


Fig. 5.- Correspondencia entre los perfiles de ganancia Raman y de ruido ASS.

La Tabla I representa los picos de potencia recibidos y las relaciones señal a ruido ópticas (OSNR) con bombeo. En ella se detalla la mejora de la ecualización obtenida en los canales de potencia. Se podrían obtener mejores ecualizaciones si se seleccionaran redes de difracción en un rango más amplio de longitudes de onda.

Creemos que los valores de OSNR en el bus con amplificación Raman pueden mejorarse optimizando la estrategia de bombeo. Alternativamente, se han demostrado otros diseños de buses de amplificación que mejoran la OSNR [8], [9].

TABLA I: Resumen de potencias ópticas recibidas y de relaciones señal a ruido, según datos de Figs. 2 & 3

	S1 (1539.9 nm)	S2 (1534.9 nm)	S3 (1534.3 nm)	S4 (1531.0 nm)
Precibida (sin bombeo), dBm	-49.7	-53.4	-57.5	-59.9
Precibida (con bombeo), dBm	-41.4	-40.9	-42.2	-42.6
OSNR (con bombeo), dB	16.3	16.6	15.4	15.3

La figura 6 es una representación de la variación de la ganancia Raman on-off de los cuatro sensores como función de la potencia de bombeo lanzada. Se trata de una variación lineal. Al igual que en las otras medidas, se utilizó un solo láser sintonizable que fue ajustándose alternativamente a las longitudes de onda de las cuatro redes de difracción Bragg.

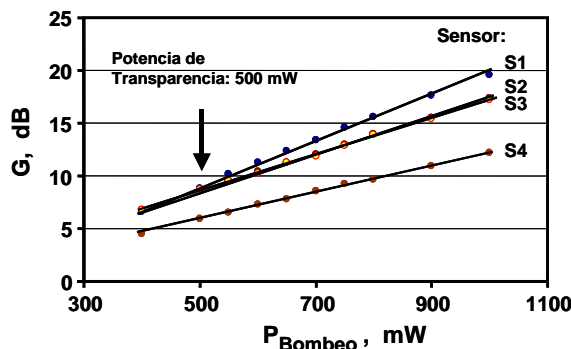


Fig. 6.- Variación de la ganancia Raman on-off en función de la potencia de bombeo. Ver Fig. 1 con la posición de los sensores.

bombeo mayores pueden proporcionar mayor ganancia para permitir redes de buses más largos.

Cuando se utilizan mayor número de sensores, las potencias totales de señal pueden inducir saturación de la ganancia. Sin embargo, debe notarse que se han utilizado potencias de señal mayores de las necesarias para muchas aplicaciones, por tanto, se puede evitar operar en saturación mediante la reducción de la potencia de la señal.

La red que se utilizó en esta demostración tiene acopladores que no son óptimos, ya que presentaban pérdidas de paso de 0.45 dB a la longitud de onda de bombeo. Se pueden conseguir mejoras mediante (a) mejor selección de las longitudes de onda de las redes de difracción Bragg, para aumentar la ecualización de las potencias de vuelta de los sensores y (b) con esquemas alternativos de bombeo, tales como bombeo bi-direccional y/o bombeo con varias longitudes de onda para controlar el perfil de la ganancia Raman. Además, el acoplador inicial de lanzamiento malgastaba las potencias de bombeo y de señal. Sin embargo, los resultados mostrados en las figuras 2-6 demuestran que la amplificación Raman tiene la capacidad potencial de aumentar el número de sensores que pueden multiplexarse en una red de bus.

En tales circunstancias, es de esperar el comportamiento lineal característico de la ganancia en pequeña señal. Se ha señalado en la gráfica de la figura 6 la potencia de transparencia de 500 mW de la rama principal del bus. Claramente, potencias de

## Conclusiones

Se ha demostrado experimentalmente una nueva forma de utilizar la amplificación Raman distribuida para una red de fibra óptica tipo bus para sensores. El direccionamiento de los sensores se realiza mediante técnicas de multiplexación en longitud de onda de sensores ópticos, que se identifican mediante redes de difracción Bragg. La ganancia proporcionada es suficiente para compensar las pérdidas de la fibra de transmisión y de los acopladores direccionales. El posicionamiento adecuado de las redes de difracción dentro del bus permite además la ecualización parcial de las

potencias recibidas de todos los sensores. Se ha utilizado una sola longitud de onda de bombeo Raman. Los resultados obtenidos indican la posibilidad de extender la red de bus para multiplexar un mayor número de sensores.

## Agradecimientos

Este trabajo se ha financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología mediante los proyectos TIC2001-0877-C02 y TEC2004-05936-C02. Paul Urquhart agradece el contrato de investigación Ramón y Cajal.